

**Determining ageing condition of battery e.g. for residual duration in electric vehicle traction batteries**

**Patent number:** DE19540827  
**Publication date:** 1996-05-23  
**Inventor:** BOLL WOLF DR ING (DE)  
**Applicant:** DAIMLER BENZ AG (DE)  
**Classification:**  
- **international:** H01M10/42; G01R31/36; H02J7/00  
- **european:** H01M10/42, G01R31/36V6, H02J7/00F  
**Application number:** DE19951040827 19951102  
**Priority number(s):** DE19951040827 19951102; DE19944440971 19941117

**Abstract of DE19540827**

The respective instantaneous values of the battery aging influence variables are determined for monitoring the battery. The aging parts associated with the respective instantaneous values of the influence variables are determined based on the specified graph. The determined aging parts are summed up, to form a battery aging value as a measure for the battery aging condition. The useful end of the battery life is defined as the reaching of a normal battery aging value, which is standardised as a working life duration. A specified percent amount is obtained empirically from the specified graph, which is no longer available as power from the battery.

---

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 195 40 827 A 1

51 Int. Cl.®:  
H 01 M 10/42  
G 01 R 31/36  
H 02 J 7/00

21 Aktenzeichen: 195 40 827.6  
22 Anmeldetag: 2. 11. 95  
43 Offenlegungstag: 23. 5. 96

DE 195 40 827 A 1

30 Innere Priorität: 32 33 31  
17.11.94 DE 44 40 971.0

71 Anmelder:  
Mercedes-Benz Aktiengesellschaft, 70327 Stuttgart,  
DE

72 Erfinder:  
Boll, Wolf, Dr.-Ing., 71384 Weinstadt, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

64 Verfahren zur Bestimmung des Alterungszustandes einer Batterie

57 Es ist bekannt, eine Batterie daraufhin zu überwachen, wieviel Ladungsmenge ihr in einem jeweiligen Ladungszyklus noch entnommen werden kann. Weiter ist ein Verfahren bekannt, bei dem parallel zum Batteriebetrieb ein simulierter Batteriebetrieb rechnergestützt vorgenommen wird. Aus dem Simulationsmodell werden Batteriezustandsgrößen abgefragt, z. B. eine Aussage über das Batterialter. Es wird ein Verfahren zur Batteriealterungszustandsbestimmung vorgeschlagen, bei dem ein Batteriealterungskennfeld empirisch vorgegeben wird, wobei als eine Eingangsgröße die als batteriealterungsrelevant erkannte Größe Entlademenge pro Entladezyklus herangezogen wird. Anhand des vorgegebenen Kennfeldes und einer laufenden Meßwertüberwachung an der Batterie werden Alterungsanteile für den jeweils momentanen Batteriezustand ermittelt und die Batteriealterung durch Aufsummieren der ermittelten Alterungsanteile bestimmt. Es zeigt sich, daß dieses Verfahren bei vergleichsweise einfacher Realisierung die wichtigsten, alterungsrelevanten Einflußgrößen in adäquater Weise für eine zuverlässige Alterszustandsbestimmung der Batterie berücksichtigt. Verwendung z. B. zur Restlebensdauerbestimmung von Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen oder zur Bestimmung der verbliebenen Nennkapazität, d. h. Reichweite.

DE 195 40 827 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Bestimmung des Alterungszustandes einer Batterie. Ein solches Verfahren wird beispielsweise für Traktionsbatterien von Elektrofahrzeugen benutzt, da es für den Betreiber eines Elektrofahrzeuges wichtig ist, über den Alterungszustand und damit über die präsumptive Restlebensdauer der Traktionsbatterien von Elektrofahrzeugen werden stark beansprucht und haben nur eine begrenzte Lebensdauer in dem Sinne, daß mit zunehmender Gebrauchsdauer die einspeicherbare Ladungsmenge soweit absinkt, daß die Batterie zum Fahrbetrieb nicht mehr einsetzbar ist. Mit der Kenntnis über den Alterungszustand der Traktionsbatterie läßt sich die mögliche Fahrzeugreichweite abschätzen, und es kann eine Sollfunktion einer solchen Batterie derart erstellt werden, daß Abweichungen hiervon während des Betriebes auf einen Batteriedefekt hindeuten, der über ein entsprechendes Anzeigegerät dem Fahrer angezeigt werden kann. Auch andere Fahrerinformationen, wie z. B. die Aufforderung zu einem Ladungsreset, d. h. einer Vollauffladung der Batterie, wie er nach mehreren Teilladungszyklen zur Kalibrierung der Ladezustandsanzeige zweckmäßig ist, können bei Kenntnis des Batteriealters mit größerer Genauigkeit bereitgestellt werden. Die Mechanismen, die zur Alterung von Batterien führen, sind sehr unterschiedlich. Als Haupteffekte sind zu nennen die Beeinträchtigung des Ionenaustauschs durch Verschmutzung oder sonstige Inaktivierung der Kontaktflächen der Reagenzien oder des Elektrolyten bzw. Ionentransmitters sowie die Inaktivierung eines Teils der chemischen Reaktionsmasse durch unerwünschte chemische Nebenreaktionen oder durch den Aufbau isolierender Zwischenschichten. Welche Effekte dominieren, hängt nicht nur von den verwendeten Chemikalien, sondern auch von der geometrischen Bauart und der Technologie des Batterieherstellers ab, wobei gewisse Haupteinflüsse allen Systemen gemeinsam sind, z. B. die Alterungsabhängigkeit von der pro Entladezyklus der Batterie entnommenen Ladungsmenge und der jeweils noch eingespeicherten Restladungsladungsmenge.

Es ist eine große Vielzahl von Verfahren bekannt, den Ladezustand einer Batterie innerhalb eines Entladezyklus zu bestimmen, z. B. durch Messung der Batteriespannung unter Last oder Erfassen der bisherigen Entladedauer nach einem Ladevorgang. Stellvertretend seien hierzu beispielhaft die Patentschriften US 4.743.831, US 5.065.084 und US 4.017.724 sowie die Offenlegungsschriften DE 41 12 987 A1 und DE 42 21 513 A1 genannt. Diese Verfahren sind hingegen nicht dazu vorgesehen, eine Aussage über den Alterungszustand der Batterie zu machen.

In der Patentschrift DE 40 14 737 C2 wird ein Verfahren zur Bestimmung des Ladungszustands und weiterer physikalischer Größen einer Batterie beschrieben, bei dem unter anderem auch die Gewinnung einer Altersinformation vorgesehen sein kann. Das Verfahren beruht auf dem Prinzip, parallel zu den realen Batterieprozessen eine modellgestützte Simulation durchzuführen, der dieselben Prozeßeingangsgrößen wie dem realen Prozeß zugeführt werden. Die Simulation verwendet ein Modell mit einem Feld von Parametern. Nach einem jeweiligen Prozeßzyklus werden die am realen Prozeß gemessenen Werten mit den aus der Simulation gemessenen Werten verglichen und abhängig davon die Modellparameter im Sinne einer Minimierung der Abweichung zwischen realen und modellierten Prozeßausgangsgrößen angepaßt. Als Prozeßeingangsgrößen dienen beispielsweise die Stromstärke, die Zeit sowie die Batterie- und die Umgebungstemperatur, während z. B. die Batteriespannung in ihrem zeitlichen Verlauf eine Prozeßausgangsgröße darstellt.

Aus der Offenlegungsschrift DE 34 29 145 A1 ist ein Verfahren zum Bestimmen des Ladezustands einer aufladbaren Batterie durch Berechnen der Batteriegesamtkapazität mittels der sogenannten Peukert'schen Gleichung sowie Integrieren des Batteriestroms über die Zeit und Berechnen des prozentualen Anteils der noch nicht benutzten Batteriekapazität bekannt. Dabei wird das jeweilige Batteriealter als eine Eingangsgröße der Peukert'schen Gleichung benötigt und dadurch bestimmt, daß ein inkrementaler Lebensalterzähler immer dann schrittweise erhöht wird, wenn ein vollständiger Entladezyklus von einem Ladezustand größer als 80% des maximalen Ladezustands zu einem solchen unter 40% desselben festgestellt wurde.

Der Erfindung liegt als technisches Problem die Bereitstellung eines Verfahrens zur Bestimmung des Batteriealterungszustandes zugrunde, das vergleichsweise einfach durchzuführen ist sowie eine verhältnismäßig zuverlässige Abschätzung der Restlebensdauer einer Batterie erlaubt.

Dieses Problem wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst. Dem Verfahren liegt die Erkenntnis zugrunde, daß die Gesamtlebensdauer einer Batterie hauptsächlich von einer oder einigen Batteriealterungseinflußgrößen abhängt, wobei eine davon die Entlademenge, d. h. die der Batterie entnommene Ladungsmenge, pro Entladezyklus darstellt. Denn es zeigt sich, daß die Batteriealterung wesentlich davon abhängt, welche Ladungsmenge ihr pro Entladezyklus im Verlauf ihrer Betriebsdauer jeweils entnommen wird. Anhand eines deterministischen Modells für die Batteriealterungsdauer in Abhängigkeit dieser und ggf. weiterer, als relevant erkannter Größen wird zunächst ein Kennfeld empirisch erstellt, das für jeden Satz von Einflußgrößenwerten angibt, wie lange die Batterie unter diesen Bedingungen mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit betrieben werden könnte, oder anders gesagt, welche Ladungsmenge, z. B. ausgedrückt in Einheiten der Batterieennkapazität, der Batterie dann insgesamt im Laufe ihrer Lebensdauer entnehmbar wäre. Durch laufende Bestimmung der Werte für die Einflußgrößen während des Batterieeinsatzes läßt sich anhand des Kennfeldes in einer mit verhältnismäßig geringem Aufwand durchführbaren Weise direkt eine Abschätzung des Batteriealterungszustandes gewinnen.

Dabei wird zu jedem Entlade- oder Ladezyklus ein Alterungsanteil in Abhängigkeit von dem jeweils vorliegenden Satz von Einflußgrößenwerten anhand des Kennfeldes bestimmt, in den hauptsächlich der Bruchteil eingeht, den der jeweilige Zyklus an der im Kennfeld abgelegten Batteriealterungsdauer unter den entsprechenden Bedingungen hat. Der jeweilige Batteriealterszustand wird dann als Summe dieser Alterungsanteile bestimmt. Es zeigt sich, daß die dadurch gemachte Annahme von sich additiv verhaltenden Alterungseinflüssen einzelner Entlade- oder Ladezyklen das Verfahren sehr praktikabel machen und zu plausiblen Abschätzungen der Batteriealterungszustandes führen.

rierestlebensdauer führen. Das Verfahren kann zudem im Verlaufe seiner Anwendung zu stetig verbesserter Genauigkeit dadurch führen, daß das die empirischen Daten repräsentierende Kennfeld jeweils mit den am vorliegenden Batteriesystem erhaltenen Resultaten aktualisiert wird.

In Ausgestaltung der Erfindung nach Anspruch 2 wird für die Erzeugung des Kennfeldes die für einen jeweiligen Satz von Einflußgrößenwerten zu erwartende Batterielebensdauer durch die Zeitdauer definiert, ab der im statistischen Durchschnitt ein vorgegebener Prozentsatz überwachter Batterien des jeweiligen Typs einen vorgegebenen Leistungswert nicht mehr erreicht.

In Weiterbildung der Erfindung nach Anspruch 3 wird neben der Entlademenge pro Entladezyklus auch die bei jedem Entladezyklus jeweils erreichte Entladetiefe als Batteriealterungseinflußgröße berücksichtigt. Es zeigt sich, daß dies zu einer Genauigkeitsverbesserung führt, da die Batteriealterung nicht nur von der jeweils entnommenen Entlademenge, sondern auch von der am Ende eines Entladezyklus noch vorhandenen Batterieladungsmenge abhängt.

Weitere Genauigkeitsverbesserungen lassen sich durch zusätzliche Berücksichtigung eines restlebensdauerabhängigen Alterungsfaktors und/oder eines Vibrationen berücksichtigenden Alterungsfaktors gemäß Anspruch 4 erzielen.

In einer Weiterbildung der Erfindung nach Anspruch 5 wird der Alterungswert als additiv aus einem betriebsbedingten und einem lagerungsbedingten, d. h. einen die Zeitdauer seit Fertigung der Batterie berücksichtigten, Alterungswert zusammengesetzt angenommen, so daß dadurch auch die unabhängig von ihrem Betrieb vorhandene Alterung der Batterie in das dem Verfahren zugrunde liegende Modell eingeht. In weiterer Ausgestaltung wird gemäß Anspruch 6 berücksichtigt, daß sich der jeweilige Batterieladezustand auf die lagerungsbedingte Alterung auswirkt.

Eine erhöhte Genauigkeit in der Alterungsbestimmung läßt sich des weiteren durch eine Weiterbildung der Erfindung nach Anspruch 7 erreichen, bei welcher der sogenannte Memoryeffekt und/oder die Temperaturabhängigkeit der Batteriealterung berücksichtigt wird.

In gleicher Weise können gemäß Anspruch 8 auch Alterungseffekte berücksichtigt werden, die durch chemische Nebenreaktionen entstehen, wie sie von Überladungen oder Tiefentladung und gegebenenfalls Umpolung her bekannt sind. Außerdem läßt sich nach Anspruch 9 die bisher eingetretene Alterung dergestalt berücksichtigen, daß alle weiteren Ladungsentnahmen in ihrer Schädigungswirkung auf die verbliebene Restkapazität oder Restleistung bezogen werden.

In vorteilhafter Ausgestaltung der Erfindung nach Anspruch 10 wird der Alterungszustand der Batterie in einem Permanentspeicher abgelegt, dem ein Bordrechner Daten zur Berechnung der Batterierestreichweite entnehmen kann. Bei Bedarf kann gemäß Anspruch 11 zusätzlich die Abgabe eines Warn- oder Fehlersignals durch den Bordrechner bei Abweichung des Batteriearbeitspunktes von seinem alterungsgemäßen Nennarbeitspunkt vorgesehen sein.

Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung werden nachfolgend in Verbindung mit den diese veranschaulichenden Zeichnungen näher erläutert. Hierbei zeigen:

Fig. 1 eine Darstellung der funktionellen Abhängigkeit der bei einem Entladezyklus maximal entnehmbaren Ladung in Abhängigkeit von der insgesamt über die bisherige Lebensdauer entnommenen Ladungsmenge bei verschiedenen Entlademengen pro Entladezyklus für typische Fahrzeug-Traktionsbatterien,

Fig. 2 eine Darstellung der sich aus Fig. 1 ergebenden Lebensdauerkurve im Diagramm von Entlademenge pro Entladezyklus und gesamter entnommener Batterieladungsmenge,

Fig. 3 ein typischer Ausschnitt aus dem zeitlichen Verlauf der Batteriestromstärke und der gespeicherten Batterieladung während eines Batteriebetriebes,

Fig. 4 eine graphische Darstellung der Häufigkeit entnommener und eingespeicherter Ladungsmengen pro Lade- bzw. Entladezyklus im Zeitabschnitt von Fig. 3,

Fig. 5 eine graphische Darstellung der Entlademengen in verschiedenen Ladungsklassen im Zykluszeitraum von Fig. 3,

Fig. 6 zwei graphische und eine tabellarische Darstellung eines weiteren typischen Ausschnitts aus dem Zeitverlauf eines Batteriebetriebes mit Entladeklassifikation,

Fig. 7 eine graphische Darstellung von Lebensdauerkurven im Diagramm von Restladungsmenge und insgesamt entnommener Ladungsmenge,

Fig. 8 eine graphische Darstellung der funktionalen Abhängigkeit eines lagerungsbedingten Alterungsfaktors vom Ladezustand,

Fig. 9 eine graphische Darstellung der funktionalen Abhängigkeit eines selbstverstärkenden Alterungsfaktors in Abhängigkeit von der Batterierestlebensdauer und

Fig. 10 eine graphische Darstellung der funktionalen Abhängigkeit eines vibrationsbedingten Alterungsfaktors von der Vibrationsbeschleunigung.

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, daß die Ladungsmenge, die insgesamt einer Batterie im Verlaufe ihrer Lebensdauer entnommen werden kann, bis sie sich durch Alterung soweit verschlechtert hat, daß sie nicht mehr eine bestimmte Mindestladungsmenge einzuspeichern vermag, in signifikanter Weise davon abhängt, welche Ladungsmenge der Batterie pro Entladezyklus entnommen wird. Es zeigt sich, daß die Batterie um so schneller altert, d. h. daß ihr um so weniger Gesamtladungsmenge während ihrer Lebensdauer entnehmbar ist, je mehr Ladung pro Entladungszyklus entnommen wird. Dieser Zusammenhang ist in den Fig. 1 und 2 veranschaulicht.

Fig. 1 zeigt den Zusammenhang von in einem Entladezyklus jeweils maximal entnehmbarer Kapazität (EK), d. h. der jeweils maximal in der Batterie einspeicherbaren Ladungsmenge, bezogen auf die Nennkapazität (N) und Batteriealterungszustand, repräsentiert durch die bisher über die Batterielebensdauer insgesamt entnommene Ladungsmenge dividiert durch deren Nennkapazität im Neuzustand, bezeichnet als Anzahl durchgesetz-

ter Nennkapazitätseinheiten (NK). In Fig. 1 sind drei Kurvenverläufe dargestellt, die den funktionalen Zusammenhang der obigen Größen für unterschiedliche Werte der pro Entladezyklus entnommenen Ladungsmenge (EM) bezogen auf die jeweilige Maximalkapazität bei vollgeladener Batterie wiedergeben. Die dargestellten Kurven ergeben sich idealisiert für eine Batterie, die während ihrer Lebensdauer jeweils vom vollgeladenen Zustand um die jeweils gewählte Entlademenge (EM) entladen und dann wieder aufgeladen wird. Die linke Kurve bezieht sich auf den Fall, daß die Batterie jeweils ganz entladen wird, d. h.  $EM = 100\%$ , die mittlere Kurve auf den Fall, daß die Batterie jeweils halb entladen wird, d. h.  $EM = 50\%$ , und die rechte Kurve auf den Fall, daß der Batterie jeweils nur 10% ihrer eingeladenen Ladungsmenge entnommen wird, d. h.  $EM = 10\%$ . In allen drei Fällen ist die entnehmbare Ladungsmenge zunächst etwas größer als die Nennkapazität im Neuzustand, d. h.  $EK = 100\%$ , und fällt dann im weiteren Batteriebetrieb stetig ab. Sobald sich in die Batterie nur noch eine Ladungsmenge einspeichern läßt, die kleiner als ein vorgegebener Grenzwert ist, wird dies als Gebrauchsende und damit maximales Batteriealter definiert. In Fig. 1 ist dieser Gebrauchsende-Grenzwert zu 80% der Nennkapazität gewählt, veranschaulicht durch die zugehörige horizontale Gebrauchsendelinie (GE), die um den entsprechend vorgewählten Abstand unter der Nennkapazitätlinie (NL) liegt. Der jeweilige Schnittpunkt (a, b, c) der drei Kurven in Fig. 1 mit der Gebrauchsendelinie (GE) stellt folglich das jeweilige Gebrauchsende einer entsprechend entladenen Batterie dar, wobei sich erkennbar wesentlich unterschiedliche Batteriealter ( $NK_a$ ,  $NK_b$ ,  $NK_c$ ), d. h. insgesamt der Batterie über ihr Lebensalter hinweg entnehmbare Ladungsmengen ergeben. Es zeigt sich, daß die insgesamt entnehmbare Ladungsmenge mit steigender Entlademenge pro Entladezyklus fällt, wobei typbezogen die insgesamt entnehmbare Ladungsmenge zwischen dem 500fachen und dem 2000fachen der Batterienennkapazität beträgt.

Dieser Zusammenhang ist in Fig. 2 dargestellt. Dort ist über der Anzahl durchgesetzter Nennkapazitätseinheiten (NK), d. h. insgesamt entnommener Ladungsmenge in Einheiten der Nennkapazität, die pro Entladezyklus entnommene Ladungsmenge (EM) wiederum in Prozent der Nennkapazität (N) abgetragen. In dem von diesen beiden Größen gegebenen Diagramm ist die Lebensdauerlinie (LD) eingezeichnet, welche folglich die Anzahl insgesamt durchsetzbarer Nennkapazitätseinheiten (NK) für einen bestimmten Wert der Ladungsentnahmemenge (EM) pro Entladezyklus angibt. Auf dieser Linie (LD) liegen folglich unter anderem auch die drei in Fig. 1 gezeigten Schnittpunkte (a, b, c). Der fallende Verlauf der Lebensdauerlinie (LD) spiegelt die erwähnte Tatsache der schnelleren Alterung bei größerer Ladungsentnahmemenge (EM) pro Entladezyklus wider. Unter der Voraussetzung einer vor Beginn eines Entladezyklus jeweils wieder vollgeladenen Batterie entspricht im übrigen die entnommene Ladungsmenge (EM) der sogenannten Entladetiefe (ET), wenn letztere als Differenz zwischen der bei vollgeladener Batterie jeweils eingespeicherten Ladungsmenge und der am Ende eines Entladezyklus noch vorhandenen Ladungsmenge definiert wird. Aus der jeweils ermittelten Maximalanzahl durchsetzbarer Nennkapazitätseinheiten läßt sich bei konstanter Entlademenge (EM) leicht die Anzahl insgesamt mit der Batterie durchführbarer Entladezyklen als Quotient der Maximalanzahl durchsetzbarer Nennkapazitätseinheiten dividiert durch die Entlademenge (EM) pro Zyklus angeben. Wenn beispielsweise für den Fall der mittleren Kurve von Fig. 1, d. h. jeweils halbeladener Batterie, also  $EM = 0,5$ , die Anzahl durchsetzbarer Ladungseinheiten ( $NK_b$ ) bis zum Gebrauchsende 1100 beträgt, d. h.  $NK_b = 1100$ , so lassen sich mit der Batterie bis zum Gebrauchsende 2200 Entladezyklen durchführen.

Diese vorstehend beschriebene Erkenntnis über die von der Entlademenge abhängige Batteriealterung dient nun als Modellgrundlage für die nachfolgend beschriebene, eigentliche Batteriealterungsbestimmung. Es sei hierbei noch erwähnt, daß sich das obige Alterungsprinzip bei allen Batteriesystemen findet. Als Basis für das Alterungsbestimmungsmodell, welches Kennlinien der in Fig. 2 dargestellten Art verwendet, werden Untersuchungen mit einem jeweiligen Satz von Batterien durchgeführt, in denen die jeweils in das Modell eingehenden Parameter, wie z. B. die Entlademenge pro Entladezyklus (EM) variiert und die Meßdaten statistisch ausgewertet werden, bis die für das Modell angenommenen mathematischen Beziehungen eine ausreichende Zuverlässigkeit der Alterungsbestimmung ergeben. So kann z. B. festgesetzt werden, daß das Verfahren als brauchbar gilt, wenn ein bestimmter Prozentsatz, z. B. 90%, aller überwachten Batterien zu dem Zeitpunkt, der vom Verfahren als Gebrauchsende festgelegt wird, noch betriebsfähig sind, da das Verfahren dann jedenfalls eine sehr zuverlässige Abschätzung des Batteriealters nach unten gibt.

Als Ausgangspunkt für die Verfahrensdurchführung wird daher zunächst ein Kennfeld für die empirisch ermittelte Batteriealterung in Abhängigkeit von den als relevant erachteten Batteriealterungseinflußgrößen angelegt, welches die statistisch zu erwartende Batteriealterungsbestimmung für jeden Satz von Einflußgrößenwerten angibt, wenn die Batterie idealisierterweise stets mit den diesen Werten entsprechenden Bedingungen betrieben wird. Ausgehend hiervon besteht das Verfahren nunmehr darin, die relevanten Batteriealterungseinflußgrößen während des Batteriebetriebes zu erfassen, jedem Auftreten eines bestimmten Satzes von Einflußgrößenwerten einen Alterungsanteil zuzuordnen und diese Alterungsanteile aufzusummieren. Hat die Summe einen bestimmten Wert, in normierten Einheiten den Wert eins, überschritten, so wird dies als statistisches Gebrauchsende der Batterie interpretiert, das beispielsweise dadurch im Kennfeld definiert sein kann, daß während der empirischen Versuchsreihe ein vorgegebener Prozentsatz, z. B. 90%, der geprüften Batterien bestimmte Leistungswerte, z. B. verschiedene elektrische Eigenschaften wie die einspeicherbare Ladungsmenge, nicht mehr erreichen. Es wird also angenommen, daß sich die verschiedenen Alterungseinflüsse in unabhängige, additive Anteile zerlegen lassen, was sich in der Praxis als sehr brauchbare Näherung erweist. Der jeweilige Alterungsanteil bestimmt sich als Anteil des durch den jeweiligen Satz von Einflußgrößenwerten charakterisierten Betriebszyklus an der zu diesem Wertesatz in dem Kennfeld abgelegten, zu erwartenden Lebensdauer. Als Einflußgröße wird dabei in jedem Fall die Entlademenge pro Entladezyklus herangezogen, um deren aus den Fig. 1 und 2 ersichtlichen Einfluß auf die Batteriealterung zu berücksichtigen. Daneben können je nach angestrebter Genauigkeit und zur Verfügung stehendem Aufwand weitere Einflußgrößen berücksichtigt werden, soweit deren Einfluß auf die Batteriealterung bekannt und über das Kennfeld quantitativ abgelegt werden kann.

Nachfolgend wird genauer auf ein mit geringem Aufwand durchführbares Verfahrensbeispiel dieses Typs sowie mögliche Abwandlungen hiervon eingegangen.

Als erste Näherung wird die plausible Annahme gemacht, daß die durch Lagern bedingte Alterung der Batterie unabhängig von der betriebsbedingten Batteriealterung ist. Damit läßt sich eine zu erwartende, auf eine normierte Restlebensdauer (LR) in der Form

$$LR = 1 - A_B - A_L$$

schreiben, wobei  $A_B$  die betriebsbedingte Alterung und  $A_L$  die lagerungsbedingte Alterung der Batterie bezeichnen. In erster Näherung läßt sich weiter die lagerungsbedingte Alterung ( $A_L$ ) durch

$$A_L = t/T_M$$

ausdrücken, wobei  $t$  die Zeit seit der Herstellung bzw. der Erstaktivierung durch Säurebefüllung und  $T_M$  die maximale Batterielebensdauer ohne Entlade- und Ladezyklen bezeichnen.

Zur Bestimmung der betriebsbedingten Batteriealterung ( $A_B$ ) wird in einer ersten Näherung angenommen, daß in den zugehörigen Alterungsmechanismus nur die Entladevorgänge und nicht die Ladevorgänge eingehen, und zwar zunächst nur abhängig von der jeweils entnommenen Ladungsmenge (EM) unabhängig vom Ladelevel der Batterie am Ende einer Teilentladung. Diese Annahme ist nicht wirklichkeitsfern, da viele Batterietypen erst in der Nähe der Tiefentladung eine Alterungsabhängigkeit als Funktion des Ladezustandes zeigen. Dieser Betriebsbereich wird aber meist durch Batteriecontroller vermieden. Dementsprechend werden verfahrensgemäß im laufenden Batteriebetrieb die Ladungsentnahmemengen (EM) der aufeinanderfolgenden Entladezyklen durch kontinuierliche Batteriestromüberwachung erfaßt. Fig. 3 zeigt einen Ausschnitt aus einer solchen Überwachung in Diagrammform, und zwar zeigt das obere Diagramm die Stromstärke ( $I$ ) in Abhängigkeit von der Zeit ( $t$ ) und das untere Diagramm die im selben Zeitraum in der Batterie gespeicherte Ladung ( $Q$ ). Jeder Nulldurchgang ( $t_1$  bis  $t_9$ ) der dargestellten Stromstärke-Zeit-Kurve bedeutet das Ende eines Entladezyklus, wenn die Kurve zuvor unterhalb der Abszisse verlief, oder eines Ladezyklus, wenn die Kurve zuvor über der Abszisse lag. Durch Aufintegrieren der Kurve für jeden Zyklus ergibt sich die jeweils beim Entladen der Batterie entnommene Ladungsmenge ( $Q_1, Q_3, Q_5, Q_7, Q_9$ ) bzw. beim Laden derselben eingespeicherte Ladungsmenge ( $Q_2, Q_4, Q_6, Q_8$ ). Im unteren Diagramm ist der zugehörige Zeitverlauf der in der Batterie jeweils gespeicherten Ladungsmenge ( $Q$ ) bei anfangs mit der vollen Nennladung ( $Q_{\text{nenn}}$ ) aufgeladener Batterie eingezeichnet. Die nachfolgende Tabelle 1 veranschaulicht die für den Betriebsausschnitt von Fig. 3 erhaltenen Werte für die in den neun Zyklen umgesetzten Ladungsmengen, wobei positive Werte eingespeicherte und negative Werte entnommene Ladungsmengen, jeweils in Prozent der Batterienennkapazität, bezeichnen.

Tabelle 1

Zyklus i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q_i$	-49	+16	-38	+32	-8	+12	-11	+15	-12

Der betriebsbedingte Alterungsanteil ( $A_B$ ) ergibt sich aus der Summe der einzelnen Alterungsanteile für jeden Entladezyklus. Der Anteil eines jeden Entladezyklus wird hierbei dadurch aufgefunden, daß anhand der empirisch ermittelten, abgelegten Lebensdauer kennlinie (LD), wie sie in Fig. 2 dargestellt ist, der zur erfaßten Ladungsentnahmemenge (EM) dieses Zyklus gehörige Wert der Maximalanzahl (NK) durchsetzbarer Ladungseinheiten mit dieser Entlademenge aufgesucht und die auf die Nennkapazität normierte Entlademenge (EM) durch diesen Wert dividiert wird. Als praktische Vereinfachung kann der Entlademengenbereich von 0% bis 100% in Intervalle, z. B. mit einer Länge von jeweils 10%, unterteilt und jeder Entladezyklus gemäß seiner Entlademenge einem dieser Intervalle zugeordnet werden. Zur Bestimmung der bisherigen betriebsbedingten Batteriealterung wird zunächst für jedes Intervall die Häufigkeit enthaltener Entladezyklen mit dem Entlademengenmittelwert des Intervalls multipliziert und durch die zum Intervallmittelwert gehörige Maximalanzahl (NK) durchsetzbarer Ladungseinheiten dividiert, und anschließend werden die so ermittelten Alterungsanteile jedes Intervalls aufsummiert.

Zur Verdeutlichung wird die Anwendung dieser Altersanteilsberechnung auf den Betriebsabschnitt von Fig. 3 beschrieben. In Fig. 4 ist zunächst die Häufigkeit ( $N_{\text{Lad}}$ ) der Lade- und Entladezyklen gemäß Tabelle 1 als Histogramm abgetragen, wobei die Ladungsmengen in Intervalle mit einer Länge von jeweils 10% der Nennladung klassifiziert sind. Die  $Q_+$ -Halbachse gibt dabei die Ladezyklen und die  $Q_-$ -Halbachse die Entladezyklen an. Betrachtet man von dem Histogramm der Fig. 4 nur die Entladevorgänge und multipliziert die Häufigkeit ( $N_{\text{Lad}}$ ) jedes Intervalls mit dessen Ladungsmengenmittelwert, so erhält man die Darstellung von Fig. 5, welche die insgesamt pro Entladungsintervall entnommene Ladungsmenge ( $N_K$ ) in Histogrammform als jeweiligen Bruchteil der Nennkapazität wiedergibt. Aus Tabelle 1 bzw. Fig. 4 ergibt sich, daß im Entnahmemengenintervall von 0% bis 10% ein Entladezyklus, im Intervall von 11% bis 20% zwei Zyklen und in den Intervallen von 31% bis 40% sowie von 41% bis 50% wieder jeweils ein Zyklus liegen. Mit den durch die Lebensdauerlinie (LD) gegebenen Werten der Maximalanzahl durchsetzbarer Ladungseinheiten  $NK(5\%) = 1700$ ,  $NK(15\%) = 1530$ ,  $NK(35\%) = 1260$  und  $NK(45\%) = 1150$  für die Entnahmemengenintervallmittelwerte 5%, 15%, 35% beziehungsweise

45% ergibt sich für den gesamten betriebsbedingten Alterungsanteil dieses Betriebsabschnitts:

$$A_B = 1 \cdot \frac{0,05}{1700} + 2 \cdot \frac{0,15}{1530} + 1 \cdot \frac{0,35}{1260} + 1 \cdot \frac{0,45}{1150} \approx 0,00089$$

Die Batterie ist folglich um 0,089% ihrer Gesamtlebensdauer während dieser Betriebsphase gealtert. Erst wenn die Summe aller Altersanteile den Wert 1 erreicht, ist definitionsgemäß das Gebrauchsende der Batterie erreicht, indem ihr dann mit 90%iger Wahrscheinlichkeit nur noch 80% ihrer Nennkapazität entnehmbar ist. Es versteht sich, daß mit dem Verfahren außer der so definierten Restlebensdauer bei z. B. empirisch ermittelter Kenntnis der Abhängigkeit der Batteriespeicherkapazität auch die jeweils aktuelle maximale Entladefähigkeit, d. h. die maximal in der Batterie noch speicherbare Ladungsmenge, bestimmt werden kann. Auch dieser Wert kann ebenso wie der Restlebensdauerwert in eine Ladezustands- und Reichweitenanzeige für die Traktionsbatterie des Elektrofahrzeuges eingehen.

Zur Genauigkeitsverbesserung kann ausgehend von dem vorstehend beschriebenen Algorithmus auf folgende einfache Weise zusätzlich die Alterungsabhängigkeit von der Entladetiefe, d. h. der Differenz zwischen momentaner Batteriekapazität und nach einem Entladezyklus jeweils noch ein gespeicherter Restladungsmenge (RL), additiv wie folgt berücksichtigt werden. Anstelle der Lebensdauerlinie (LD) von Fig. 2 tritt ein zweidimensionales Lebensdauerkenntfeld, das ebenfalls wieder empirisch ermittelt wird und von dem in Fig. 7 der Zusammenhang zwischen Lebensdauer, ausgedrückt in der Maximalanzahl (NK) durchgesetzter Nennkapazitätseinheiten, und Restladung (RL) nach einem jeweiligen Entladezyklus, angegeben in Prozent der Nennkapazität (N), für 4 Entlademengenintervalle wiedergibt, wobei die erste Kurve (LL<sub>1</sub>) zum Entlademengenintervall von 91% bis 100%, die zweite (LL<sub>2</sub>) zum Intervall zwischen 41% und 50%, die dritte (LL<sub>3</sub>) zum Intervall zwischen 11% und 20% und die vierte Kurve (LL<sub>4</sub>) zum Intervall zwischen 0% und 10% der Batteriekapazität gehört. Es ist aus dieser Figur erkennbar, daß bei konstanter Entlademenge pro Zyklus die Batterielebensdauer mit steigender Entladungstiefe und damit fallender Restladungsmenge (RL) abnimmt, insbesondere bei großer Entladungstiefe und damit kleiner Restladungsmenge (RL), was die Empfindlichkeit dieses Batterietyps auf Tiefentladungen widerspiegelt.

Der betriebsbedingte Alterungsanteil wird in diesem Fall aus der Überwachung des Batteriestroms und dem abgelegten, zweiparametrischen Kenntfeld dadurch bestimmt, daß für jeden Entladezyklus das zugehörige Parameterpaar bestehend aus Entlademenge (EM) und Restladungsmenge (RL) bestimmt und der Kehrwert der dazugehörigen Maximalzahl durchsetzbarer Ladungseinheiten (NK) ermittelt und mit der zugehörigen Entlademenge (EM) multipliziert wird.

Wiederum läßt sich das Verfahren dadurch praktisch vereinfachen, daß auch der Restladungsmengenbereich (RL) in Intervalle von z. B. 10% Länge unterteilt und jeder Entladezyklus einem vorgegebenen Intervallpaar zugeordnet wird. Ein diesbezügliches Beispiel ist in Fig. 6 veranschaulicht. Das oberste Diagramm von Fig. 6 zeigt den Verlauf der Batteriestromstärke (I) in Abhängigkeit von der Zeit (t) innerhalb eines ausgewählten Abschnitts des Batteriebetriebs analog zum oberen Diagramm von Fig. 3. Dabei treten jeweils alternierend Entlade- und Ladezyklen auf, wobei die jeweils durchgesetzte Ladungsmenge in Prozent der Nennladung (Q<sub>Nenn</sub>) angegeben ist. Die letzten beiden Entladezyklen mit jeweils 15% Entlademenge werden zu einem einzigen Entladezyklus mit 30% Entlademenge zusammengefaßt, da dazwischen kein Ladezyklus erfolgt. Das darunterstehende Diagramm zeigt wieder entsprechend zu Fig. 3 die im selben Zeitraum jeweils noch in der Batterie eingespeicherte Ladung (Q) ausgehend von einer vollgeladenen Batterie. Die entlang der Ladungskurve angegebenen Prozentangaben stellen jeweils die Entladungstiefe dar, d. h. die Differenz zwischen Nennladung (Q<sub>Nenn</sub>) und der momentanen Batterieladung (Q) am Ende eines jeweiligen Entlade- bzw. Ladezyklus. Die in Fig. 6 untenstehende Tabelle gibt die Ladungsintervallklassifikation für die einzelnen Entlademengenintervalle (j) und Entladungstiefenintervalle (i) tabellarisch an, wobei die vier Entladezyklen des in den darüberstehenden Diagrammen gewählten Zeitraums mit ihrer Häufigkeit in das Tabellenfeld eingetragen sind. Für eine Bestimmung der jeweils momentanen betriebsbedingten Alterung werden dann die Anteile aller Intervallpaare (I<sub>i</sub>, j) aufsummiert, die sich wiederum aus der Häufigkeit zugehöriger Entladezyklen multipliziert mit dem zugehörigen Mittelwert des Entladungsmengenintervalls und dividiert durch die zugehörige Maximalanzahl durchsetzbarer Ladungseinheiten ergibt, so daß sich die betriebsbedingte Alterung (A<sub>B</sub>) in der Form

$$A_B = \sum_{i,j} A_{i,j}$$

schreiben läßt, wobei A<sub>i,j</sub> den Anteil eines Intervallpaares darstellt. Als Beispiel ergibt sich für die Betriebsphase von Fig. 3 bei Anwendung dieser Verfahrensvariante ein jeweils einmaliges Auftreten eines Entladezyklus für die Intervallpaare 0% bis 10% Entlademenge und 41% bis 50% Restladungsmenge, 31% bis 40% Entlademenge und 21% bis 30% Restladungsmenge sowie 41% bis 50% Entlademenge und 51% bis 60% Restladungsmenge sowie ein zweimaliges Auftreten des Intervallpaares mit 11% bis 20% Entlademenge und 51% bis 60% Restladungsmenge unter der Voraussetzung einer im Anfangszeitpunkt vollgeladenen Batterie.

Je nach Anwendungsfall kommen weitere Verfahrensvarianten zur Genauigkeitserhöhung in Betracht. So kann der obige Algorithmus entsprechend auf Ladezyklen erweitert werden, wenn für den Mechanismus der Batteriealterung auch die Aufladung der Batterie eine Rolle spielt. Bei Batterien mit Memoryeffekt, z. B. NiCd-Batterien, die zwecks Normalisierung vor einem Volladen erst Entladen werden, ist eine Verfahrensab-

wandlung zweckmäßig, bei welcher die obigen Alterungsanteile ( $A_{ij}$ ) der Entladeintervallpaare innerhalb eines Normalisierungsintervalls summiert und diese Zwischensummen mit gesonderten Beiwerten ( $\phi_k$ ) versehen und erst dann zur Gesamtsumme gemäß

$$A_s = \sum_k \sum_{i,j} A_{i,j} \cdot \phi_k$$

5

aufaddiert werden.

Bei Bedarf kann außerdem die Geschwindigkeit der Be- oder Entladung mitberücksichtigt werden, sofern die daraus resultierenden thermischen Belastungen nur unvollkommen durch Kühlsysteme ausgeglichen werden. Dafür gebildete Beiwerte lassen sich am besten empirisch durch Messen der Temperaturabweichung relativ zur Ruhetemperatur erfassen. Da die thermische Belastung zum jeweiligen Be- oder Entladezyklus gehört (bei Bleibatterien wegen deren Temperaturkonstanz beim Entladen nur für die Beladung), wird in diesem Fall der Temperatureinfluß als Koeffizient ( $\varphi_t$ ) direkt dem Intervallpaar-Alterungsanteil ( $A_{ij}$ ) zum jeweiligen Zeitpunkt ( $t$ ) zugeordnet, d. h.

$$A_s = \sum_t \sum_{i,j} A_{i,j} \cdot \varphi_t$$

20

Sofern sich herausstellt, daß die lagerungsbedingte Alterung vom Ladezustand der Batterie abhängt, kann dies durch einen Ladungsbeiwert ( $\lambda$ ), der einem jeweiligen Ladezustand zugeordnet wird, berücksichtigt werden, so daß sich dieser modifizierte Alterungsanteil ( $A_L$ ) zu

25

$$A_L = \sum_k t_k \cdot \lambda_k / T_k$$

ergibt (siehe Definitionsformel S. 11). In Fig. 8 ist beispielhaft für einen bestimmten Batterietyp eine derartige Abhängigkeit des Ladungsbeiwertes ( $\lambda$ ) vom Ladezustand, d. h. der Restladungsmenge (RL), gezeigt. Dabei stellt der Ladungsbeiwert ( $\lambda$ ) einen dimensionslosen Schädigungsfaktor dar, z. B. altert eine tiefentladene Batterie wesentlich schneller als eine volle.

Wenn die Batterie von einem Typ ist, der einen selbstverstärkenden Alterungseinfluß besitzt, z. B. durch Teilinaktivierung aufgrund von Nebenreaktionen und einer damit verbundenen höheren Belastung der restlichen Reaktionsmasse, kann dies durch einen weiteren Parameter ( $\tau$ ) berücksichtigt werden. Fig. 9 zeigt einen typischen Verlauf dieses Alterungsverstärkungsfaktors ( $\tau$ ) in Abhängigkeit von der jeweiligen momentanen, normierten Restlebensdauer (RL). Dieser Faktor ( $\tau$ ) wirkt sich hierbei sowohl auf den betriebsbedingten wie auch auf den lagerungsbedingten Alterungsanteil aus.

Außerdem kann bei Bedarf in ähnlicher Weise eine durch mechanische Vibrationen verursachte Batteriealterung berücksichtigt werden. In Fig. 10 ist eine typische derartige Abhängigkeit eines Vibrationsalterungsbeiwertes ( $\sigma$ ) von der mittleren, auf die Erdbeschleunigung normierten Vibrationsbeschleunigung ( $a$ ) bezogen auf Vibrationen mit 15Hz dargestellt. Auch dieser Alterungsfaktor beeinflusst den betriebsbedingten und den lagerungsbedingten Alterungsanteil.

Aus der obigen Beschreibung bevorzugter Verfahrensvarianten wird deutlich, daß das vorliegende Verfahren mit vergleichsweise geringem meß- und rechentechnischen Aufwand eine sehr zuverlässige Bestimmung des Alterungszustandes und damit der zu erwartenden Restlebensdauer einer im Betrieb befindlichen Batterie, z. B. einer Traktionsbatterie eines Elektrofahrzeuges, ermöglicht, wobei empirisch ermittelte Kenndaten und ein einfach handhabbarer Algorithmus verwendet werden, in die jeweils die für die Batteriealterung als relevant erkannten Einflußgrößen eingehen.

Um die Restreichweite der Traktionsbatterie berechnen zu können, wird der jeweils ermittelte Alterungszustand der Batterie in einem Permanentspeicher des verfahrensdurchführenden Systems abgelegt. Aus diesem Speicher kann ein Bordrechner dann die Daten entnehmen, die er zur Berechnung der jeweils verbliebenen Nennkapazität und damit der Restreichweite der Batterie benötigt. Zusätzlich kann der Bordrechner dem Permanentspeicher Daten entnehmen, um eine Abweichung des Batteriearbeitspunktes vom alterungsgemäßen Nennarbeitspunkt feststellen zu können, woraufhin er ein Warn- oder Fehlersignal abgibt.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung des Alterungszustandes einer Batterie, gekennzeichnet durch folgende Schritte:

- Vorgeben eines Kennfeldes der Batteriealterung in Abhängigkeit einer wenigstens die Größe Entlademenge pro Entladezyklus (EM) enthaltenden Gruppe von Batteriealterungseinflußgrößen,
- Erfassen der jeweiligen Momentanwerte der Batteriealterungseinflußgrößen bei der überwachten Batterie und Ermitteln des zu diesen jeweiligen Momentanwerten der Einflußgrößen gehörigen Alterungsanteils anhand des vorgegebenen Kennfeldes sowie
- Aufsummieren der ermittelten Alterungsanteile zur Bildung eines Batteriealterungswertes als Maß für den Batteriealterungszustand.



2. Verfahren nach Anspruch 1, weiter dadurch gekennzeichnet, daß das Gebrauchsende der Batterie als Erreichen des Wertes eines normierten Batteriealterungswertes definiert wird, der auf eine Lebensdauer normiert ist, ab der empirisch ein vorgegebener Prozentsatz zur Kennfeldvorgabe untersucht er Batterien vorgegebene Leistungswerte nicht mehr erreicht.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, weiter dadurch gekennzeichnet, daß die nach einem jeweiligen Entladezyklus vorliegende Restladungsmenge (RL) als Batteriealterungseinflußgröße berücksichtigt wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, weiter dadurch gekennzeichnet, daß ein von der Restlebensdauer ( $L_R$ ) und/oder ein von Vibrationen ( $a$ ) abhängiger Alterungsfaktor ( $\tau$ ,  $\sigma$ ) als Batteriealterungseinflußgrößen berücksichtigt werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, weiter dadurch gekennzeichnet, daß sich der Batteriealterungswert additiv aus einem betriebsbedingten Alterungswert ( $A_B$ ) und einem lagerungsbedingten Alterungswert ( $A_L$ ) zusammensetzt.
6. Verfahren nach Anspruch 5, weiter dadurch gekennzeichnet, daß der jeweilige Batterieladezustand (RL) in Form eines Faktors ( $\lambda$ ) als Batteriealterungseinflußgröße in den lagerungsbedingten Alterungsanteil eingeht.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, weiter dadurch gekennzeichnet, daß der Batteriememoryeffekt und/oder die Batterietemperatur als Batteriealterungseinflußgrößen in Form eines jeweiligen Faktors ( $\Phi$ ,  $\Psi$ ) in den betriebsbedingten Alterungsanteil eingehen.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, weiter dadurch gekennzeichnet, daß chemische Nebenreaktionen, welche die Kapazität oder Leistung der Batterie beeinträchtigen, als Alterungsanteil gewertet werden.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, weiter dadurch gekennzeichnet, daß die bisher eingetretene Alterung dergestalt berücksichtigt wird, daß alle weiteren Ladungsentnahmen in ihrer Schädigungswirkung auf die verbleibende Restkapazität oder Restleistung bezogen werden.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, weiter dadurch gekennzeichnet, daß Alterungszustandsdaten der Batterie in einem Permanentpeicher abgelegt werden, wobei die Daten von einem Bordrechner auslesbar und zur Berechnung der Batterierestreichweite auswertbar sind.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, weiter dadurch gekennzeichnet, daß Alterungszustandsdaten der Batterie in einem Permanentpeicher abgelegt werden, die von einem Bordrechner aus lesbar und zur Feststellung einer Abweichung des Batteriearbeitspunktes von seinem alterungsgemäßen Nennarbeitspunkt auswertbar sind, wobei der Bordrechner bei erkannter Abweichung ein Warn- oder Fehlersignal abgibt.

---

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

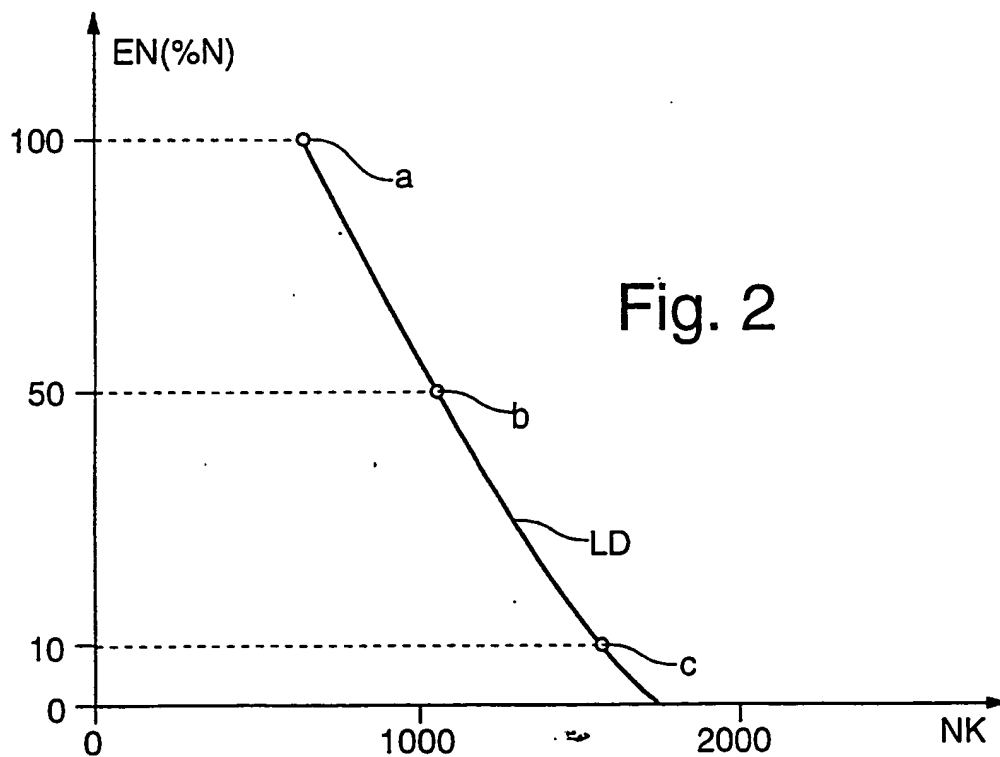
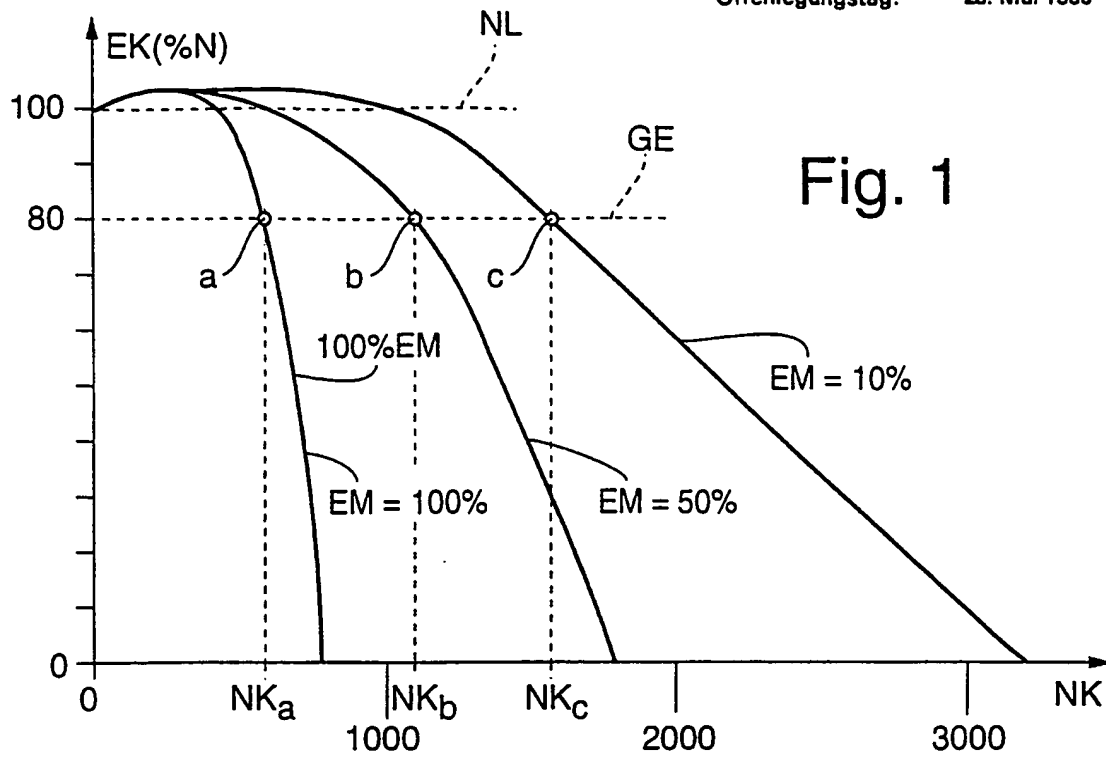


Fig. 3

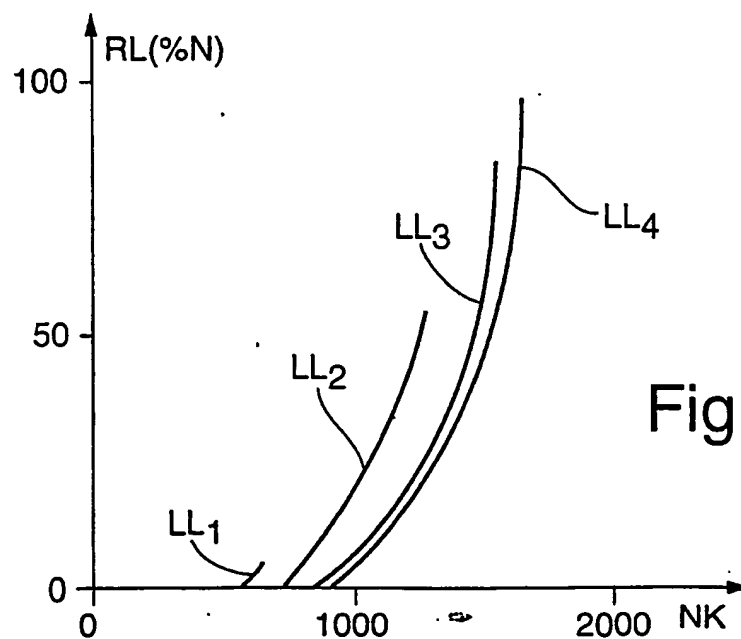
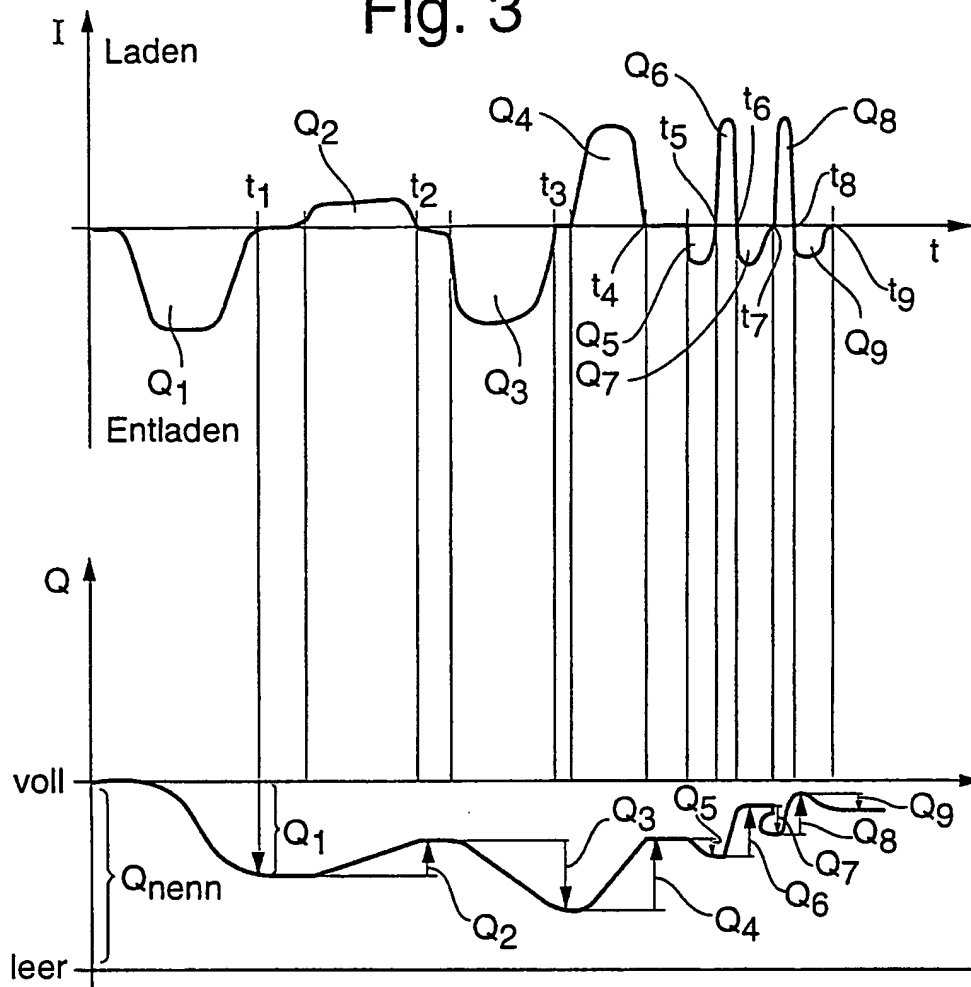


Fig. 7

Fig. 4

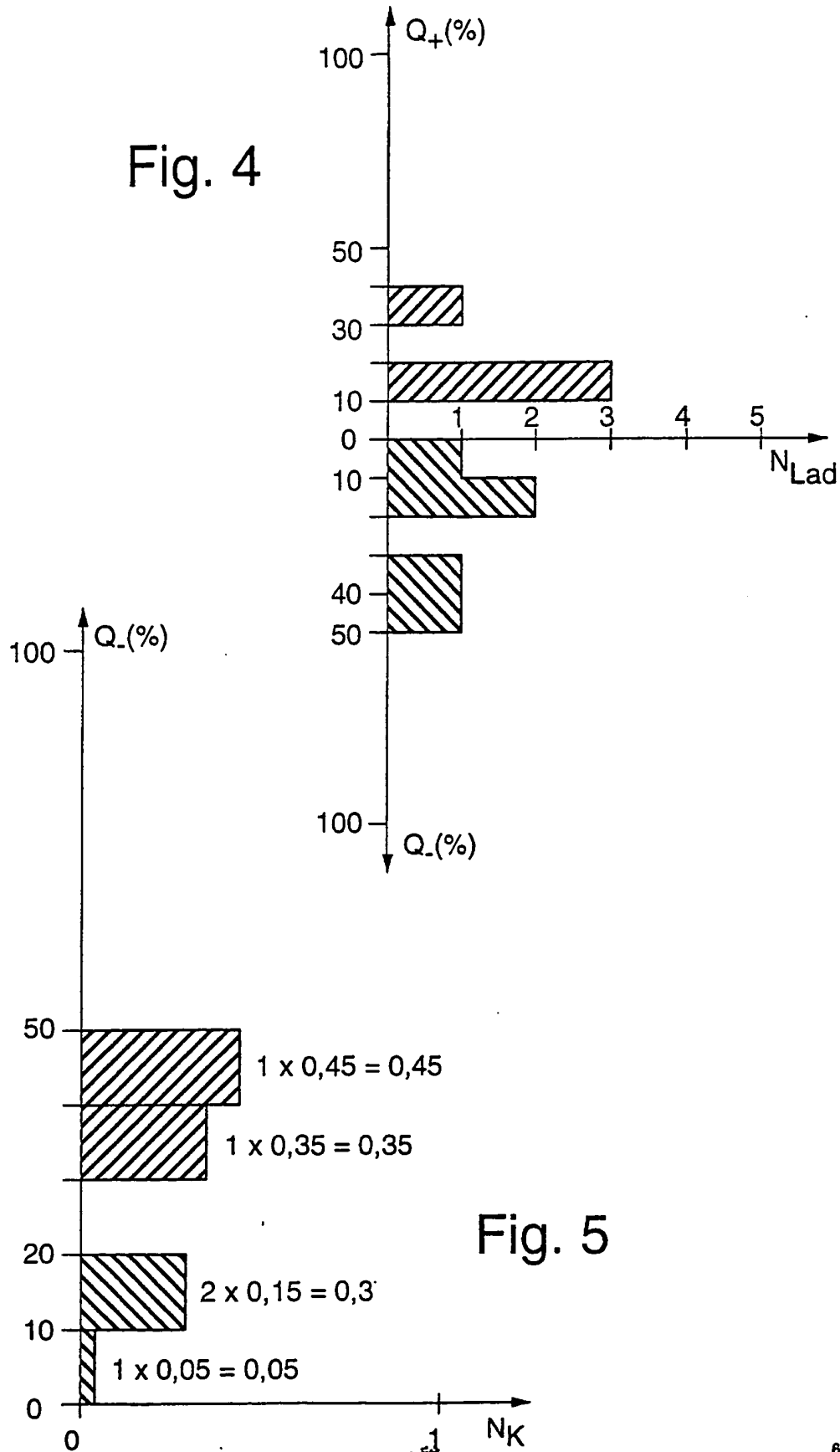
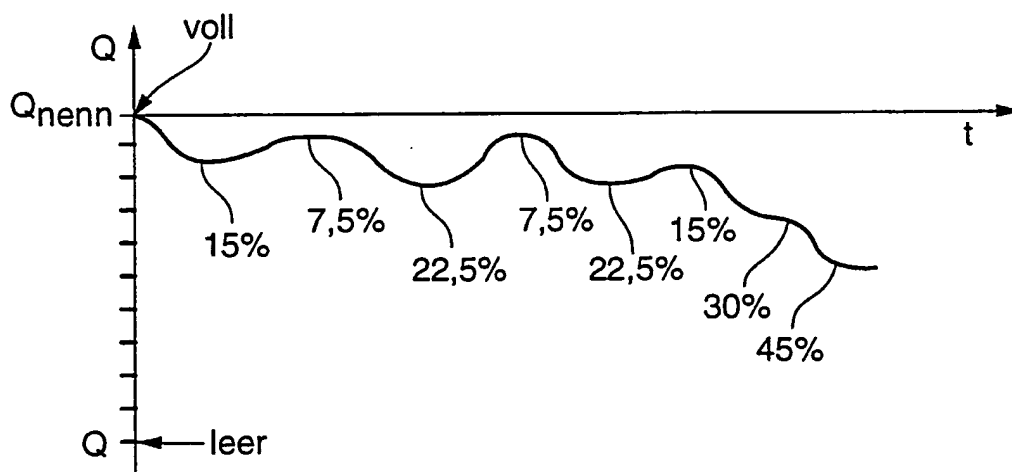
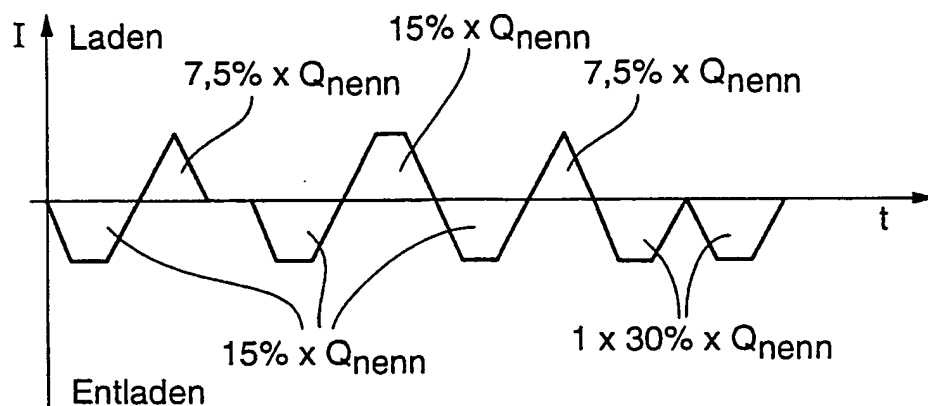


Fig. 5

Fig. 6



$i \backslash j$	0-10%	10-20%	20-30%	30-40%	...	
0-10%						
10-20%		1	2			
20-30%						
30-40%						
40-50%				1		
·						
·						
·						

Fig. 8

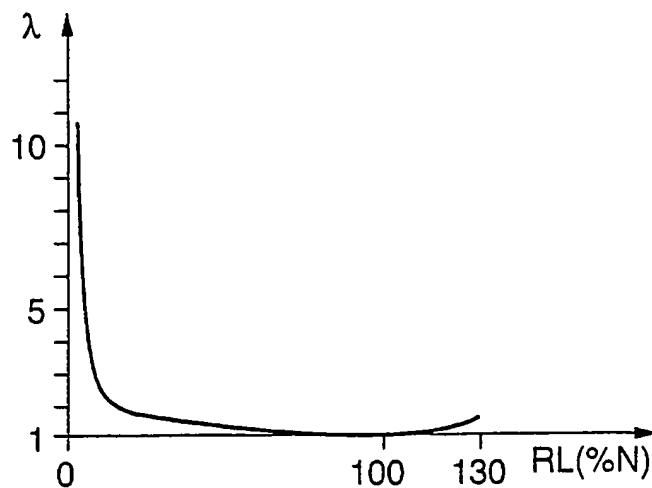


Fig. 9

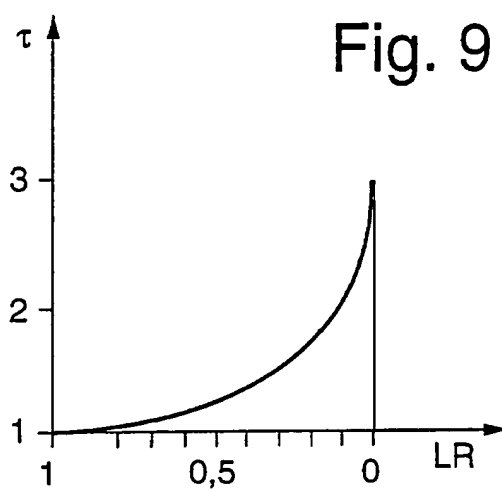


Fig. 10

